



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO PARA O ESTUDO DO
LIMITE DE INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

Natan Gabriel Becchi

Lajeado, novembro de 2018

Natan Gabriel Becchi

**SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO PARA O ESTUDO DO
LIMITE DE INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Yuri Solis Stypulkowski

Lajeado, novembro de 2018

Natan Gabriel Becchi

**SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO PARA O ESTUDO DO
LIMITE DE INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica:

Prof. Me. Yuri Solis Stypulkowski – orientador
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Me. Alexandre Stürmer Wolf
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Dr. Juliano Schirmbeck
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado, 05 de dezembro de 2018

RESUMO

A energia elétrica é um recurso presente em todos os países, tamanha sua importância em aspectos econômicos e sociais. Uma grande parte da estrutura física existente para comportar a transmissão e a distribuição de eletricidade foi projetada seguindo um modelo tradicional, mais antigo: grandes máquinas geradoras de energia localizadas à distância das maiores concentrações de consumidores. Todavia, o crescimento contínuo da demanda por energia elétrica somado às tecnologias mais recentes de microgeração fez surgir um novo modelo, cada vez mais difundido: a geração distribuída. Considerando as diversas vantagens da implantação da geração distribuída às redes elétricas e objetivando evitar o redimensionamento de condutores e equipamentos de custo elevado nas redes existentes, este trabalho visa determinar a máxima penetração admissível da geração distribuída no sistema, sem que sejam necessárias substituições de componentes. Uma vez que a manipulação matemática de modelos de redes elétricas envolve uma grande quantidade de variáveis e combinações, é proposto um algoritmo baseado em valores aleatórios, examinados a cada simulação, para que seja determinado o melhor caso dentre os testados. Este algoritmo é fundamentado no método de Monte Carlo utilizando os softwares MATLAB e OpenDSS para analisar um circuito existente, já modelado, para então realizar um grande volume de simulações, contemplando diversas combinações de geração distribuída inseridas nos nós do circuito. Dentre as simulações comportadas pelos condutores e equipamentos da rede, será escolhida aquela com a maior penetração de geração distribuída como o caso ótimo de aproveitamento do sistema. Foi escolhido um modelo de circuito disponibilizado pela desenvolvedora do OpenDSS como caso de teste, onde a atuação do algoritmo obteve sucesso. Após a utilização do mesmo em outros modelos de redes, conclui-se que o trabalho alcança o objetivo proposto.

Palavras-chave: Energia elétrica. Fluxo de potência. Sistema de distribuição.

ABSTRACT

Electrical energy is a resource found in every country, given its significance in economic and social aspects. A large part of the existing physical structure for transmitting and distributing electricity was designed following a traditional, older model: large power generating machines remotely located from the largest consumer concentrations. However, the continuous growth in demand for electrical energy, in addition to the most recent microgeneration technologies, has given rise to a new, increasingly widespread model: distributed generation. Considering the several advantages of deploying distributed generation into the electrical grid and aiming to prevent resizing high cost cables and equipment in existing networks, this paper aims to determine the maximum permissible penetration of distributed generation into the system, avoiding the need for part replacements. Since the mathematical manipulation of electrical network models comprises a large number of variables and combinations, an algorithm is proposed based on random values, examined within each simulation, to determine the best case among the ones tested. This algorithm is based on the Monte Carlo method using MATLAB and OpenDSS software to analyze an existing circuit, previously modeled, so to perform a large amount of simulations, considering several combinations of distributed generation connected onto the circuit nodes. The simulations that come out to be supported by the grid's conductors and equipment will be flagged within the application, and the one with the highest penetration of distributed generation will be chosen as the ideal case of system usage. A circuit model provided by the OpenDSS software developer was chosen as a test case, where the algorithm performed successfully. After using it in other network models, it is concluded that this paper reaches the goal set.

Keywords: Distributed generation. Distribution system. Electrical energy. Power flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de distribuição com geração distribuída	10
Figura 2 – Geração fotovoltaica distribuída	19
Figura 3 – Ideia genérica do método de Monte Carlo	23
Figura 4 – Topologia do circuito utilizado como caso de teste	26
Figura 5 – Modelagem do circuito no OpenDSS	26
Figura 6 – Biblioteca do OpenDSS no VBA	28
Figura 7 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido	30
Figura 8 – Tensão na rede sem inserção de GD	33
Figura 9 – Perfis de tensão antes e depois da otimização	35
Figura 10 – Resultados no console do MATLAB	36
Figura 11 – Tempo de execução para 1.000 simulações no caso J1	37
Figura 12 – Resultados do caso J1 no console do MATLAB	37
Figura 13 – Perfis de tensão do caso K1 antes e depois da otimização	38
Figura 14 – Resultados do caso K1 no console do MATLAB	38
Figura 15 – Perfil de tensão do caso K1 após alteração de parâmetros	40
Figura 16 – Resultados do caso K1 após alteração de parâmetros	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Contribuição das diversas formas de energia à geração no mundo.....	15
Tabela 2 – Contribuição das diversas formas de energia à geração no Brasil.....	16
Tabela 3 – Principais fontes e opções de armazenamento de energia renovável.....	16
Tabela 4 – Dados do circuito original	32
Tabela 5 – Exemplo de caso reprovado.....	33
Tabela 6 – Caso ideal de penetração de GD no circuito de teste	34
Tabela 7 – Comparação entre os resultados dos três casos.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
CIGRÉ	Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
COM	Component Object Model
CSV	Comma-Separated Values
DSG	Dispersed Storage and Generation
DSS	Distribution System Simulator
EPRI	Electric Power Research Institute
FP	Fluxo de Potência
GD	Geração Distribuída
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
MATLAB	Matrix Laboratory
MMC	Método de Monte Carlo
MT	Média Tensão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
VBA	Visual Basic for Applications

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo geral	10
1.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Justificativa do trabalho	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 Transmissão e distribuição de energia	13
2.2 Geração de energia elétrica.....	15
2.3 Geração distribuída.....	17
2.3.1 Energia solar.....	18
2.3.2 Energia eólica	20
2.4 Vantagens e desvantagens da geração distribuída	21
2.5 Fluxo de potência.....	22
2.6 Método de Monte Carlo.....	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 OpenDSS.....	25
3.1.1 Interface COM	27
3.2 Implementação do algoritmo.....	28
3.3 MATLAB	30
4 RESULTADOS.....	32
4.1 Caso de teste	32
4.2 Modelos padrão.....	36
4.3 Sensibilidade do algoritmo.....	39
5 CONCLUSÃO	42
5.1 Melhorias.....	43
5.2 Continuidade	43
REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

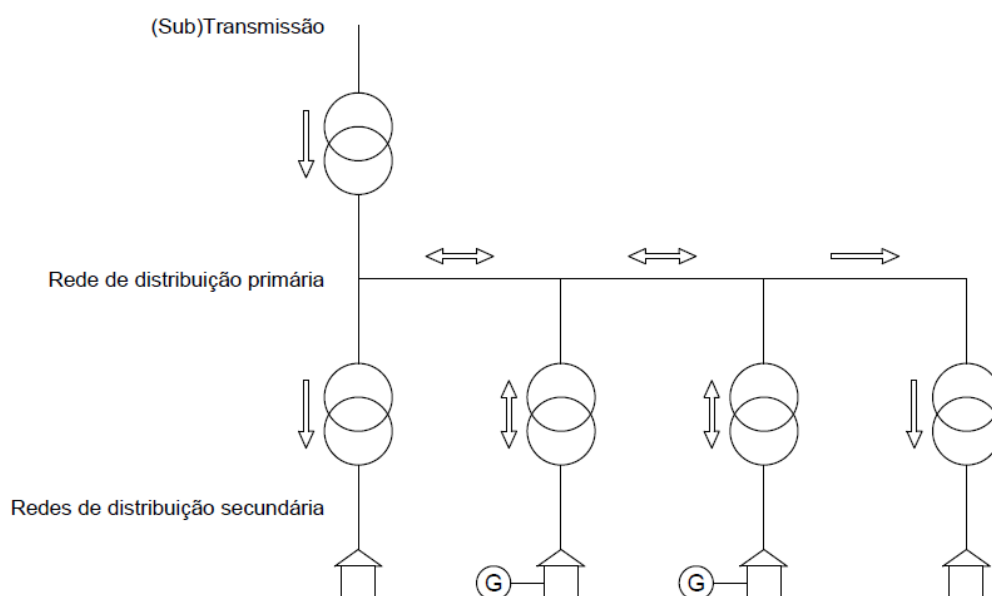
Dada a importância da energia elétrica na vida de bilhões de pessoas, são realizados vários estudos voltados a otimizar qualidade, segurança, confiabilidade e custos na implementação e manutenção das redes elétricas. Em decorrência, verifica-se que sistemas de geração de pequeno porte inseridos nos centros de carga compõem um modelo que retorna diversos benefícios ao sistema – sobretudo aos proprietários das instalações, cujo investimento é recuperado em descontos na tarifação, ou *payback* (ANEEL, 2015a), mas também à estrutura das redes de transmissão, uma vez que o fluxo de potência deslocado entre grandes geradores e centros de consumo é menor.

Assim, observa-se a tendência de aumento no número dessas instalações, identificadas como Geração Distribuída (GD), também incentivadas pela normativa MP 482 de 2012 (ANEEL, 2012) e regulamentadas pelo Decreto 5163 (PLANALTO, 2004).

Entretanto, alguns problemas nas redes de distribuição podem surgir conforme novos equipamentos são instalados, uma vez que, em redes primárias e secundárias, passa a ocorrer um deslocamento de potência irregular e não previsto para redes originalmente concebidas para operar com fluxo unidirecional.

Neste trabalho, será desenvolvido um algoritmo para analisar as redes primárias de distribuição, em média tensão (MT), considerando que as fontes de geração distribuída estão pulverizadas nas redes secundárias, de baixa tensão (BT), conforme a Figura 1.

Figura 1 – Sistema de distribuição com geração distribuída



Fonte: Autor.

Desta forma, as redes secundárias serão modeladas como potências constantes conectadas à média tensão pelos transformadores de distribuição do circuito, sendo que estes serão também responsáveis pela injeção de potência na rede primária, considerando os diversos modelos físicos das redes.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho objetiva criar um algoritmo computacional que possa determinar o limite de inserção de geração distribuída em uma rede de distribuição existente, sem que sejam necessários investimentos à melhoria da infraestrutura – ou seja, sem que sejam violados os limites técnicos avaliados na metodologia.

O resultado proposto consiste em um programa que seja capaz de receber uma rede elétrica modelada em software de simulação de sistemas de distribuição (DSS) e, a partir do método de aleatoriedade da simulação de Monte Carlo, determinar qual a maior penetração admissível da GD no sistema, dentro do universo de amostras avaliadas pelo mesmo, comportada pelas instalações existentes.

1.2 Objetivos específicos

É proposto um algoritmo genérico, capaz de exibir a potência máxima admissível de geração distribuída conectada a cada ponto de um circuito quando aplicado ao modelo de um sistema elétrico em qualquer arranjo físico.

Devem ser observados e limitados os níveis de tensão na rede e as perdas causadas pelo fluxo de potência bidirecional nos condutores. Além de apresentar uma diminuição no consumo de potência à entrada desta rede, tais limites não podem ser violados para que um caso seja considerado válido.

Ao término da execução, o programa deve exibir uma lista das barras do circuito onde podem ser inseridas fontes de geração e a potência de cada uma dessas fontes, além de um breve comparativo entre os dados originais da rede e os valores após a inserção da GD, contemplando os níveis de tensão, potência e perdas observados.

1.3 Justificativa do trabalho

Embora incentivada e benéfica para o sistema elétrico, a geração distribuída pode causar instabilidades nos sistemas de distribuição quando inserida em quantidade maior que comportada: primeiramente, a maioria da estrutura existente é antiga, projetada e construída antes da ideia de que cada consumidor poderia gerar sua própria energia e disponibilizá-la à rede (FARRET; SIMÕES, 2006).

Além disso, redes elétricas de distribuição normalmente são radiais. Mesmo que existam seccionadores que permitem a reconfiguração do fluxo de potência, estas manobras são realizadas sob demanda, e as proteções na linha e nos equipamentos foram projetadas para fluxos unidirecionais (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2013).

A manipulação matemática de modelos de redes elétricas envolve uma grande quantidade de variáveis e combinações, portanto, é proposto este algoritmo baseado em valores aleatórios, examinados a cada simulação para que seja determinado o melhor caso dentre os testados. A simplificação do problema do limite de inserção de

GD em uma rede, subsidiando estudos subsequentes para a mesma, é a principal contribuição deste trabalho.

Um método genérico para determinar o limite de inserção de GD em uma rede sem ultrapassar os limites de cabos, equipamentos e proteções, como este apresentado, também ajuda a completar os estudos de melhorias de redes que contemplem ou busquem contemplar sistemas de geração.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir são apresentados alguns conceitos acerca dos sistemas elétricos e seus subsistemas, sendo estes semelhantes no Brasil e em diversos outros países. Também é apresentado um breve conceito sobre o Método de Monte Carlo.

2.1 Transmissão e distribuição de energia

A maioria das usinas de energia elétrica é construída longe dos centros de consumo, como grandes cidades e indústrias, e por esse motivo a potência gerada tem de ser deslocada por longas distâncias por um sistema de transmissão. Para reduzir perdas nas linhas, a transmissão é feita em elevadas tensões, considerando, entre outros fatores, o comprimento dos circuitos e a potência transportada, e exigindo o uso de subestações de transformação ao longo do percurso. Também, para a obtenção de uma alta confiabilidade na entrega de grandes potências, a rede é configurada em um complexo conjunto de linhas redundantes, ou interligadas em configuração anel (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2013).

Já nas localidades onde estão instalados os consumidores, a energia elétrica tem a tensão rebaixada e passa a fluir em redes de distribuição. Estas têm menor confiabilidade em relação ao sistema de transmissão, uma vez que uma falha nas linhas afeta um número menor de consumidores, sendo projetadas em configuração radial, prevendo um fluxo de potência unidirecional (GÖNEN, 2014).

As redes de distribuição primárias operam em média tensão, que no Brasil são valores de 13,8 ou 23,1 kV, normalmente. Para pequenos consumidores – em maioria, residenciais – essa tensão ainda precisa ser rebaixada em transformadores de distribuição para 380/220 ou 220/127 volts (com neutro acessível para ligação de cargas monofásicas), formando redes secundárias de distribuição, em BT, com alcance máximo de algumas centenas de metros (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2013).

Tanto em redes de transmissão quanto em sistemas de distribuição, os diversos parâmetros (incluindo tensão, bitola dos condutores, arranjo físico e afins) observados em redes elétricas passam por estudos que abrangem as cargas instaladas, demandas, previsão de crescimento, entre vários outros (GÖNEN, 2014). Como grande parte dos centros urbanos e outros consumidores já estão eletrificados há algum tempo, a nível mundial, a maioria das instalações existentes tem sua capacidade bastante utilizada. Isso significa, na prática, a necessidade de substituição de cabos, transformadores e proteções para inserção de novos consumidores (aumento do fluxo no sentido geração-consumo) ou sistemas de geração distribuída (fluxo bidirecional) na rede (FARRET; SIMÕES, 2006; SILVA, 2015).

Para que esses estudos sejam realizados, são utilizadas ferramentas computacionais, objetivando maior exatidão no dimensionamento do circuito e a resolução de complexas operações de previsão de fluxo de potência. Antes desses procedimentos, entretanto, os dados do circuito devem ser inseridos nos softwares.

A modelagem de circuitos elétricos comumente baseia-se no modelo π , tido como satisfatório para as operações de simulação exigidas. Este considera, além das resistências e reatâncias próprias nos condutores, as impedâncias mútuas, as capacitâncias *shunt* (em relação à terra) ao longo da linha concentradas nas extremidades, e mesmo as condutâncias *shunt* no caso do modelo de linha longa (STEVENSON, 1986; FUCHS, 1979).

Assim, permite-se saber os valores nas pontas de cada linha, ou seja, em todos os nós do circuito.

2.2 Geração de energia elétrica

Geração é a conversão de alguma forma de energia em energia elétrica, com o uso de máquinas rotativas, geradores síncronos ou alternadores. Não sendo possível seu armazenamento em grande escala, a energia gerada em um sistema elétrico de potência (SEP) deve ser, instante a instante, igual à energia demandada (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2013).

Há algum tempo, a necessidade de gerar grandes quantidades de energia e a percepção de que grandes plantas de geração são mais eficientes que pequenas instalações encorajaram a construção de enormes usinas nas décadas passadas. Exceto pelas hidrelétricas, a tendência é que energias renováveis substituam completamente essas fontes tradicionais de energia, devido ao inevitável esgotamento dos recursos atualmente utilizados (FARRET; SIMÕES, 2006).

Devido ao grande potencial hídrico do país, a energia gerada no Brasil é proveniente em sua maioria de usinas hidrelétricas. Apesar de não caracterizar uma fonte alternativa de energia, a geração hídrica pode ser considerada renovável e limpa (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2013).

As Tabelas 1 e 2 mostram o percentual de cada origem da energia elétrica produzida no mundo e no Brasil, respectivamente (em 2015):

Tabela 1 – Contribuição das diversas formas de energia à geração no mundo

Fonte	%
Petróleo	31,4
Carvão mineral	29
Gás natural	21,3
Nuclear	4,8
Hidráulica	2,4
Outras renováveis	10
Outras	1,1

Fonte: BEN (2015).

Tabela 2 – Contribuição das diversas formas de energia à geração no Brasil

Fonte	%
Hidráulica	66,2
Gás natural	11,1
Biomassa	8,6
Eólica	4,5
Carvão	2,7
Petróleo	2,6
Nuclear	2,4
Gás industrial	1,9

Fonte: MME (2016).

Nos Estados Unidos e na Europa, a eletricidade depende fortemente de usinas supridas por recursos finitos, principalmente carvão, matéria nuclear, petróleo e gás. Naturalmente, são previstos e encorajados investimentos em fontes renováveis nestes locais (FARRET; SIMÕES, 2006).

Como a maioria das fontes tradicionais de energia já é bastante explorada, devido em grande parte ao preterimento de máquinas à combustão e semelhantes por equipamentos elétricos nas últimas décadas, os esforços na direção do uso de fontes alternativas de energia têm aumentado, sobretudo em relação a recursos renováveis. Dentre essas fontes, as predominantes hoje são solares e eólicas (LORA; HADDAD, 2016).

A Tabela 3, abaixo, compara as principais características das tecnologias voltadas à geração renovável de energia mais utilizadas atualmente.

Tabela 3 – Principais fontes e opções de armazenamento de energia renovável

Fonte/Armazenamento	Disponibilidade	Estabilidade	Tempo de resposta	Geração de harmônicas
Biomassa	Boa	Boa	Rápido	Não
Eólica	Incerta	Precária	Rápido	Incerta
Fotovoltaica	Incerta	Precária	Rápido	Sim
Geotérmica	Boa	Boa	Médio	Não
Térmica solar	Incerta	Precária	Variável	Incerta
Ar comprimido	Boa	Boa	Rápido	Não
Baterias	Boa	Boa	Rápido	Sim
Bombeamento de água	Boa	Boa	Rápido	Não
Células a combustível	Boa	Boa	Rápido	Sim
Microturbina hidráulica	Variável	Boa	Rápido	Não

Fonte: Adaptado de Gönen (2014).

Estas podem formar grandes centros de geração ou serem encontradas em pequenas células, conectadas diretamente a consumidores atendidos pelas redes comuns de distribuição. Este último modelo é o que denomina-se geração distribuída.

2.3 Geração distribuída

Segundo o Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ), a GD possui potências menores que 50 MW e é usualmente conectada à rede de distribuição, sem que haja um órgão que comande suas ações. Para o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), geração distribuída define-se por unidades de geração de pequeno porte e próximas ao consumo. Já o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE) entende que, independentemente de potência, tecnologia ou recurso utilizado, a GD é caracterizada quando existe geração próxima ao consumidor (ZILLES et al., 2017).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a geração distribuída pode ser definida simplesmente como uma fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou situada no próprio consumidor (ANEEL, 2012; 2017).

Uma característica da geração distribuída é que as fontes de energia utilizadas são naturalmente distribuídas, ou seja, dispensam em parte o sistema de transmissão. As mais comuns consistem em energia proveniente do sol e do vento, porém não necessariamente são convertidas em eletricidade (placas solares para aquecimento de água, por exemplo). No caso de geração elétrica, esta pode ser estar interligada à rede – caracterizando a GD – ou ser um sistema isolado (GÖNEN, 2014).

As resoluções 482, de 2012, 678 e 687, de 2015, e 786, de 2017, da ANEEL regulamentam a instalação e operação de sistemas de geração distribuída no Brasil. Além de impor limites e parâmetros para garantir a qualidade e a segurança da rede elétrica existente no local, as resoluções preveem que a energia excedente, isto é, a geração acima do consumo, pode ser injetada na rede e o proprietário da unidade consumidora recebe créditos que tornam-se descontos na tarifação de meses onde o

consumo for maior que a geração. Estes podem ser utilizados em qualquer unidade registrada sob o mesmo nome de pessoa física ou jurídica (ANEEL, 2012; 2015a; 2015b; 2017).

Entretanto, se houver sempre geração excedente, esta não é faturada para que o proprietário receba o valor correspondente da concessionária, mas apenas converte-se em crédito excedente e a fatura de energia é sempre zerada. Ou seja, antes da implantação da GD, é interessante quantificar o próprio consumo interno para evitar de ter uma instalação de GD com excedentes sem receber por isso, apesar de ter tido o custo de instalação.

Somados às resoluções da ANEEL, diversos programas de incentivo à geração distribuída e renovável têm sido criados por órgãos públicos no Brasil desde o início do século, conforme Silva (2015).

Além disso, o custo da falta de energia elétrica é levado em consideração na tomada de decisão sobre a implantação de GD, principalmente por consumidores industriais. A vantagem da geração própria, neste caso, é não depender de sistemas de transmissão e distribuição que podem, mesmo que raramente, apresentar falhas e causar prejuízos. Em condições normais, as mesmas vantagens de outros consumidores com GD são observadas (LORA; HADDAD, 2016).

Especialmente a sistemas fotovoltaicos, há uma perspectiva de crescimento rápido de instalações de geração distribuída nos próximos anos, pelos diversos motivos mencionados. As energias renováveis podem representar 10% do total gerado no planeta já em 2020, enquanto observa-se um crescimento anual de 30% na fabricação de placas solares (TOLMASQUIM, 2003; ZILLES et al., 2017).

2.3.1 Energia solar

Embora toda forma de energia presente na Terra venha, originalmente, do sol, o uso de placas fotovoltaicas tem o objetivo de realizar a conversão direta da luz radiada em eletricidade (ZILLES et al., 2017).

Esta tecnologia é altamente modular e praticamente não emite poluentes ou ruídos durante seu funcionamento, e requer pouca ou nenhuma manutenção. As placas geram uma tensão contínua que deve ser modulada em tensão alternada de acordo com as características da rede elétrica onde serão conectadas, por meio de um inversor de frequência, caracterizando um “sistema fotovoltaico conectado à rede”, ou SFCR (LORA; HADDAD, 2016).

Cada placa fotovoltaica pode ser entendida como uma bateria de baixíssima tensão, constantemente carregada de acordo com a incidência da radiação solar (FERRET; SIMÕES, 2006).

A Figura 2 ilustra uma vizinhança com SFCRs instalados nos telhados das residências:

Figura 2 – Geração fotovoltaica distribuída



Fonte: Pereira (2017).

No Brasil, a instalação de sistemas fotovoltaicos não vem sendo diferente da experiência de outros países. Ocorreu inicialmente no meio rural, em sistemas isolados, e a partir de meados da década de 1990 começou a interligar-se com a rede convencional de distribuição, principalmente em universidades e unidades de gerenciamento de energia elétrica (ZILLES et al., 2017).

Devido à cada vez maior contribuição da energia solar, e às suas características de pico de geração nas primeiras horas da tarde e zero geração a partir do pôr-do-sol (normalmente um horário de ponta), tem-se realizado um número crescente de pesquisas envolvendo tecnologias de armazenamento de energia, uma vez que a transmissão entre diferentes fusos horários é impraticável. Dessas, as mais usadas são armazenamento de ar comprimido, bombeamento de água à altura, baterias e volantes de inércia. Porém, a quantidade de armazenamento nem sempre é suficiente comparada à potência gerada a cada instante em um sistema *dispersed storage and generation* (DSG), isto é, em uma rede onde estejam inseridos tais equipamentos de geração e de armazenamento (GÖNEN, 2014).

Assim, parte da energia solar gerada nos momentos de maior irradiância, se não encaminhada a níveis mais altos das redes elétricas (quando houver capacidade nos condutores), pode ser perdida, mesmo que outros sistemas controlados, como usinas hidrelétricas e termelétricas instaladas no mesmo subsistema, mantenham baixa ou nenhuma geração nesses instantes.

2.3.2 Energia eólica

A energia dos ventos é um exemplo de força da natureza utilizada há vários séculos, mesmo antes da eletricidade, para impulsionar embarcações a vela e rodar moinhos de cereais, por exemplo. Com o surgimento dos geradores elétricos, essa é hoje uma forma de produzir energia elétrica (TOLMASQUIM, 2003).

A energia eólica também tem crescido nos últimos anos, mesmo em pequenos consumidores (neste caso conhecida por microgeração eólica), e estudos são realizados para torná-la cada vez mais rentável. Dentre as vantagens da geração a partir do vento, pode-se citar: que é uma das tecnologias de geração de energia renovável de custos de operação mais baixos atualmente; que o vento é um recurso presente em todos os países (ao contrário de combustíveis a base de petróleo, por exemplo); que não emite gases e não polui; e que pode ser instalada isoladamente em zonas rurais (SILVA, 2015; GÖNEN, 2014).

Naturalmente, há algumas desvantagens na utilização dessa tecnologia, como: a intermitência do vento (ou seja, nem sempre energia estará sendo gerada); apesar dos custos baixos, ainda requer um alto investimento inicial; as turbinas ocupam um espaço de terra que poderia ser de outra forma utilizado; as melhores localizações para a instalação de turbinas eólicas são distantes das cidades, tornando menos eficiente a interligação à rede; e podem haver alguns problemas com o ruído gerado ou mesmo em relação à estética (GÖNEN, 2014).

O mesmo problema de falta de armazenamento que ocorre com os sistemas fotovoltaicos pode acontecer com a energia eólica em redes DSG, mas de forma mais intermitente e muito menos previsível, na maioria dos casos.

2.4 Vantagens e desvantagens da geração distribuída

Dadas as informações apresentadas nos itens anteriores, é possível mencionar uma série de vantagens e desvantagens da utilização da GD e sua inserção nas redes elétricas existentes.

Dentre as vantagens da geração distribuída, pode-se citar que esta caracteriza fontes de geração complementares às grandes usinas – isto é, não trata-se apenas de uma alternativa limpa, mas que também contribui com a demanda cada vez maior por eletricidade. Mesmo assim, as fontes da GD são principalmente renováveis (solar, eólica), embora um gerador a óleo diesel também pode ser caracterizado como geração distribuída.

Também é observado um menor fluxo de potência pelas linhas de transmissão até os centros de consumo quando as fontes de GD estão em operação, o que ocasiona menos perdas elétricas por efeito Joule. Além disso, para os proprietários das instalações, existe a menor necessidade de compra de energia da concessionária e consequente economia na fatura, conforme Item 2.3.

Como principal desvantagem é possível citar o fluxo de potência bidirecional não previsto em projetos mais antigos, que pode acarretar nos problemas que este trabalho visa evitar, como violações nos níveis de tensão, aumento das perdas nas

linhas e sobrecarga nos transformadores de distribuição. O fluxo de potência em algumas ramificações das redes também pode aumentar, deixando de ser adequado para os condutores daquela seção.

Há ainda outros aspectos técnicos que devem ser levados em consideração, como o controle de tensão no nó onde é inserida a fonte de geração, os ajustes dos dispositivos de proteção como religadores e fusíveis, o desequilíbrio do neutro que pode surgir ou agravar-se em rede secundárias, entre outros.

Ainda, conforme os Itens 2.3.1 e 2.3.2, a disponibilidade de geração de energia em algumas fontes é dependente de fatores ambientais, como intensidade da luz solar, velocidade do vento e até temperatura ambiente. Isto é, por mais que seja bastante utilizada em uma instalação nos períodos de maior geração, uma fonte pode suprir apenas pequena ou nenhuma parte da demanda em outros momentos, quando não houver armazenamento da energia. Este comportamento, entretanto, pode ser previsto com bastante precisão.

2.5 Fluxo de potência

Fluxo de potência (FP), ou *Power Flow*, é o encaminhamento da energia produzida em sistemas de geração até onde a mesma é consumida (cargas), através dos sistemas de transmissão e/ou distribuição. A resolução matemática do fluxo de potência é um dos mais importantes estudos na área de sistemas elétricos de potência, e geralmente é um dos primeiros a serem feitos. Com a solução do FP, diversos outros estudos podem ser realizados: curto-circuito, estabilidade eletromecânica, análise de contingências e afins (LORA; HADDAD, 2016).

Dado o grande número de variáveis (como módulo da tensão, fase da tensão, potência ativa, potência reativa) em cada nó do circuito – que podem ser centenas – é feito o uso de algoritmos iterativos auxiliados por computador, até que os resultados convirjam para um limite de erro permitido. Os valores exatos de um fluxo de potência podem nunca ser conhecidos. Alguns dos métodos mais utilizados são: Gauss-Seidl;

Ward-Hale; Newton desacoplado; Newton-Raphson; Fluxo DC (fluxo de carga linearizado); entre outros (STEVENSON, 1986; FUCHS, 1979).

O estudo do fluxo de potência é indispensável para interligação de sistemas de GD com a rede elétrica (LORA; HADDAD, 2016).

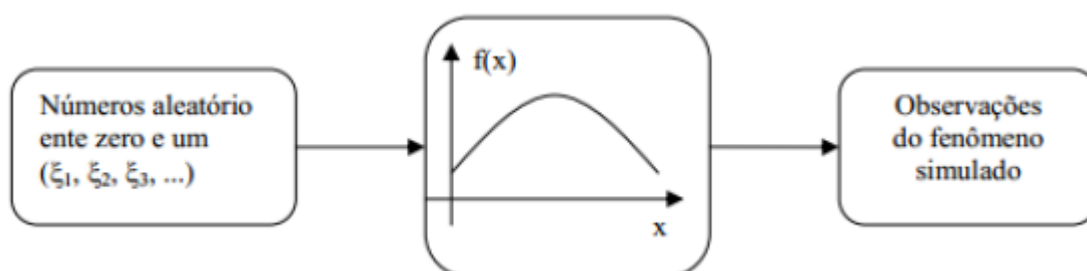
Há uma variedade de softwares dedicados à resolução do fluxo de potência de circuitos elétricos, alguns mais específicos para determinadas aplicações, outros mais genéricos. Para o desenvolvimento deste trabalho, é utilizado o programa OpenDSS, da Electric Power Research Institute (EPRI).

2.6 Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo (MMC) foi idealizado pelos matemáticos John von Neumann e Stanislaw Ulam, com a publicação do artigo "*The Monte Carlo Method*", elaborado entre 1947 e 1949 (SÓBOL, 1983). O nome do método é copiado do distrito de Monte Carlo, Mônaco, devido à fama mundial de seus cassinos e jogos de azar, cujos resultados são em sua maioria aleatórios (LAZO, 2009).

Basicamente, o MMC realiza a simulação matemática de um processo em estudo para estimar uma solução, ao contrário de métodos determinísticos que buscam solucionar as equações relacionadas ao problema. Ou seja, em determinados casos onde a manipulação matemática das equações torna-se inviável, são repetidos experimentos com valores aleatórios de entrada, e é analisado o conjunto de dados de saída (FIGURA 3). Quanto mais simulações são realizadas, mais próximos dos valores reais são os resultados (RUBINSTEIN, 1981).

Figura 3 – Ideia genérica do método de Monte Carlo



Fonte: Burban (2008).

Ainda na década de 40, a repetição manual das operações com diferentes valores era trabalhosa, o que manteve o método pouco utilizado nos primeiros anos. Porém, com o surgimento dos processadores e a tradução do método para algoritmos computacionais, este hoje mostra-se um meio simples e eficiente de resolver um problema (BURBAN, 2008; LAZO, 2009).

3 METODOLOGIA

3.1 OpenDSS

OpenDSS é um software aberto destinado à simulação de sistemas de distribuição, resolução de fluxo de potência em redes elétricas e outras situações de planejamento de sistemas elétricos de potência (OPENDSS, 2018). O OpenDSS também é o software padronizado e sugerido no Módulo 7 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) para cálculo de perdas nas redes de distribuição (ANEEL, 2014). Neste trabalho é utilizada a versão 8.1.1.10, de 64 bits.

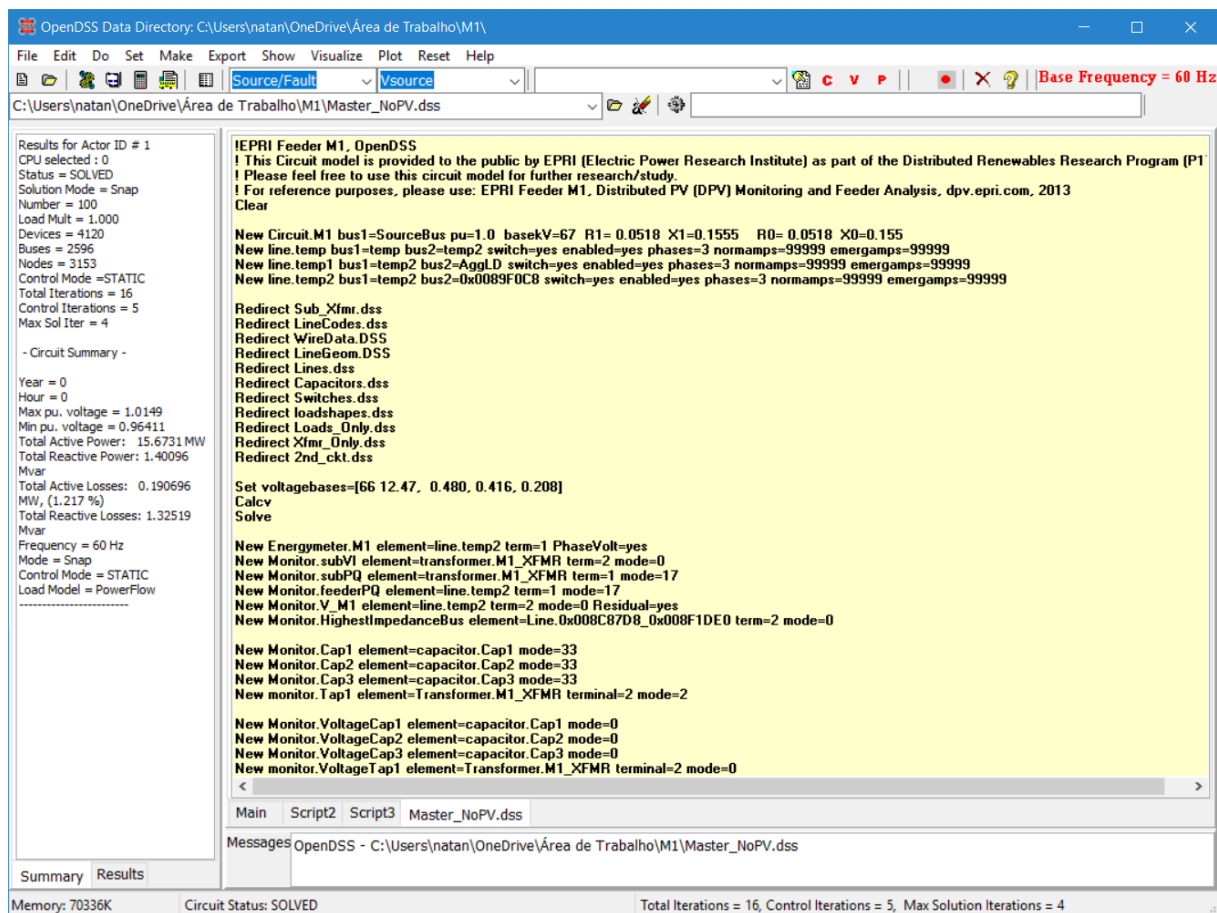
Instalado, o OpenDSS disponibiliza alguns circuitos padronizados pela IEEE modelados no formato suportado pelo programa. Para testar o algoritmo proposto, entretanto, foi escolhido um circuito disponibilizado pela EPRI (2018), por tratar-se de uma rede de distribuição primária – objetivo deste experimento – e em layout majoritariamente radial. O circuito é composto por 155 transformadores monofásicos de distribuição, alguns configurando bancos trifásicos, além de quatro transformadores trifásicos de maior potência. A maioria destes tem potência nominal de 25, 50 ou 75 kVA, e todos têm tensão de fase de 120 ou 240 volts. O transformador da subestação (SE) alimentadora tem potência de 16,8 MVA e rebaixa a tensão de 67 kV para 12,47 kV. Trata-se de uma configuração estadunidense típica. A Figura 4 ilustra a topologia do circuito, onde traços mais espessos indicam maior fluxo de potência, enquanto a Figura 5 exibe a modelagem do mesmo no programa.

Figura 4 – Topologia do circuito utilizado como caso de teste



Fonte: EPRI (2018).

Figura 5 – Modelagem do circuito no OpenDSS



Fonte: Autor.

Por padrão, o OpenDSS calcula o fluxo de potência em uma rede utilizando o modo *snapshot*, isto é, considerando as potências instantâneas das cargas e das gerações do sistema. Ainda podem ser configuradas curvas de carga ao longo de um período de tempo, o que é especialmente interessante para simulações em um dia com geração fotovoltaica, porém este contexto não será abordado no trabalho.

Para testar o algoritmo, conforme proposto, será considerado um valor aleatório de geração distribuída inserida em cada barra, com uma distribuição uniforme, para cada simulação. Esse valor será limitado entre zero e a potência nominal dos transformadores de distribuição declarados no circuito, já visando evitar a substituição destes equipamentos.

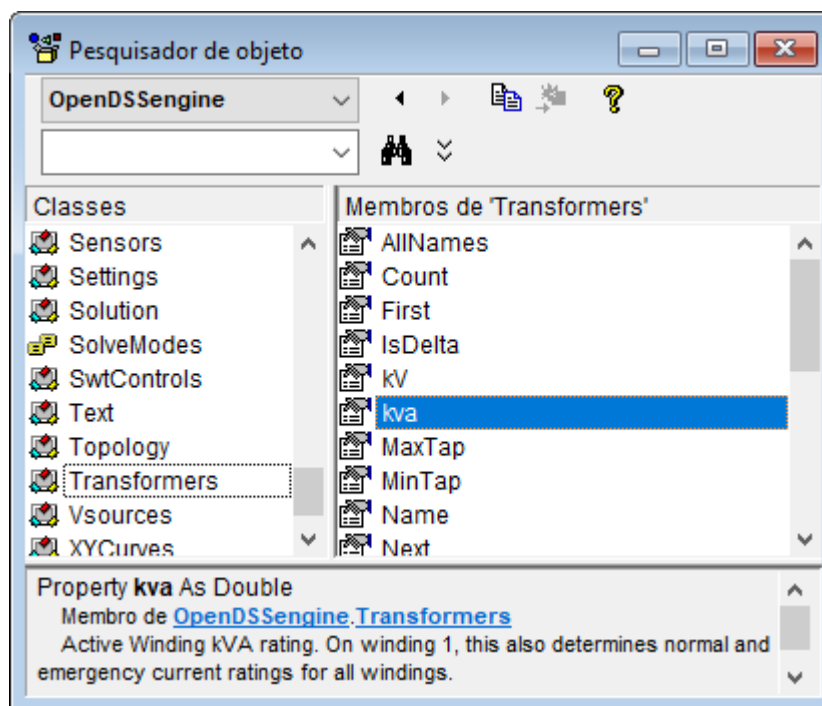
3.1.1 Interface COM

Os recursos do OpenDSS podem ser conectados a softwares de manipulação de dados através da interface Component Object Model (COM), da Microsoft Corporation.

Essa interface permite que os dados de circuitos e resoluções de FP sejam disponibilizados a softwares externos, possibilitando que estes manipulem os valores e, se necessário, retornem-nos ao OpenDSS, caracterizando uma conexão de comunicação entre os programas.

Por ser uma ferramenta da Microsoft, um dos usos mais nativos a partir desta interface é a interação com o Visual Basic for Applications (VBA), através do software Microsoft Excel. A Figura 6 exibe algumas classes e seus objetos disponíveis para acesso dos dados dos circuitos a partir de um programa externo.

Figura 6 – Biblioteca do OpenDSS no VBA



Fonte: Autor.

O pesquisador de objeto do VBA (FIGURA 6) pode ser utilizado para detalhar as funções que o OpenDSS oferece a partir da interface COM, sendo uma boa referência mesmo enquanto o desenvolvimento é feito em outro software. Para um grande volume de simulações e constante troca de dados com o OpenDSS, entretanto, um código desenvolvido para Excel pode não ter a performance ideal (SEXAUER, 2016).

3.2 Implementação do algoritmo

A aleatoriedade na instalação de componentes à rede elétrica foi promovida com uso do método de Monte Carlo. Este algoritmo computacional promove um grande número de simulações inserindo variáveis escolhidas ao acaso dentro de limites estabelecidos a cada ponto informado.

Neste caso, são inseridos sistemas de geração distribuída em cada barra (ou nó) que possua um transformador de distribuição, simulando fontes de GD instaladas nas redes secundárias. É definido pelo programa um valor aleatório entre zero e o

limite do transformador para cada componente, a cada simulação. Este valor é multiplicado por um fator declarado no início do *script* (originalmente 1) para simular a máxima sobrecarga admissível nos trafos.

São realizadas as simulações e, a cada uma delas, o fluxo de potência é resolvido pelo OpenDSS. Ao detectar que um caso violou os limites de tensão ou perdas no circuito, deve ser gerado um novo caso, e o contador de simulações incrementado.

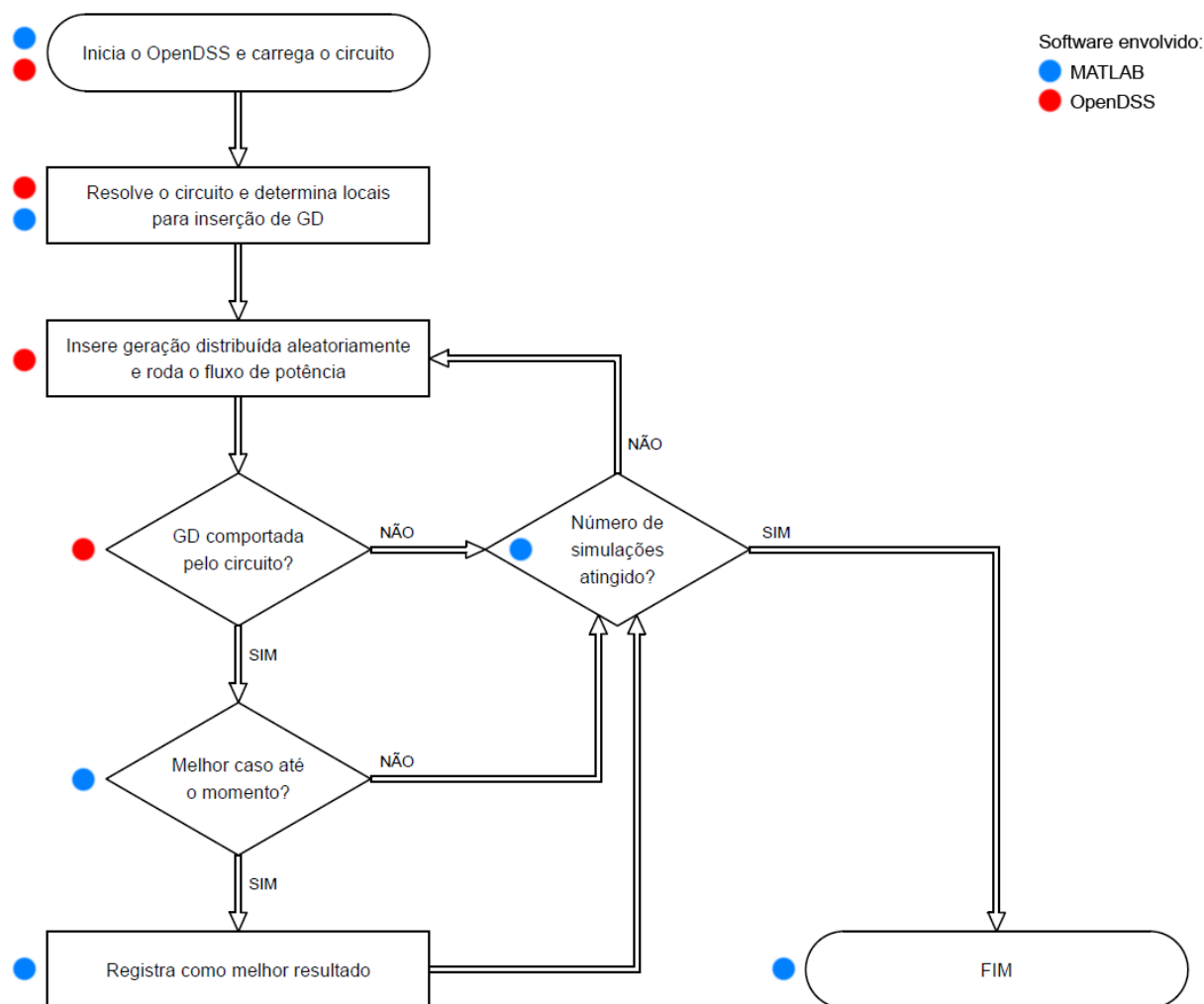
Um caso é reprovado quando sua tensão mínima for inferior a 0,95 p.u. ou quando sua tensão máxima ultrapassar 1,05 p.u. – baseando-se nos níveis que atendem ao Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018) – ou ainda quando as perdas ativas do caso forem superiores às perdas ativas do circuito original, para análise geral da rede, uma vez que não há proibição por parte das concessionárias quanto à inserção de GD quando esta aumentar as perdas nas linhas em um trecho do circuito. Estes valores também podem ser alterados a partir de variáveis declaradas no início do *script*.

Quando um caso é comportado pelas instalações do circuito, os valores atribuídos a cada barra são armazenados, juntamente com dados relevantes como a quantidade total instantânea de geração distribuída neste sistema, tensões mínima e máxima, número de componentes inseridos pelo sistema e perdas nas linhas. Esses valores são comparados à quantidade gerada por outras simulações, e aquela que apresentar os melhores resultados mantém-se armazenada como melhor caso até o momento. Ao término da execução, este será o caso apresentado.

O OpenDSS também possui modos de resolução pelo método de Monte Carlo integrados ao programa, porém mais voltados a ocorrência de falhas ou variação aleatória de carga. Neste trabalho, estes não serão abordados.

O algoritmo proposto é apresentado de forma simplificada no fluxograma exibido na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido



Fonte: Autor.

3.3 MATLAB

Uma das principais ferramentas científicas voltadas à engenharia é o software Matrix Laboratory – MATLAB, da MathWorks, Inc. Por ter suporte nativo a números complexos, manipulação de matrizes e diversos recursos necessários à resolução destes problemas, os testes de edição e controle dos dados dos circuitos foram feitos nesse programa, versão R2015a (8.5.0.197613), de 64 bits.

Primeiramente, o OpenDSS é iniciado a partir da interface COM em um *script* do MATLAB, conforme o Item 3.1.1. Na sequência, o circuito é carregado, tendo este um nome de arquivo e um diretório de trabalho já declarados.

Ainda por comandos à interface COM do OpenDSS, o fluxo do circuito é calculado, antes de qualquer inserção de fontes de GD. Desse modo, os elementos do circuito são conhecidos e podem ser determinados os pontos onde será instalada essa geração, bem como a potência total fornecida pela subestação alimentadora da rede neste momento.

Por fim, o *loop* da simulação de Monte Carlo é executado no MATLAB seguindo o fluxograma apresentado (FIGURA 7), conforme descrito no Item 3.2. Em seguida, os resultados são apresentados, exibindo a potência máxima de geração distribuída admissível em cada barra, a geração total do circuito e a potência entregue pela subestação alimentadora, também os comparando a estas mesmas grandezas antes da penetração da GD. Também são exibidas as tensões mínima e máxima, o número de componentes inseridos pelo sistema e o total de perdas nas linhas.

4 RESULTADOS

4.1 Caso de teste

O circuito apresentado no Item 3.1 foi carregado a partir do MATLAB, o fluxo de potência foi resolvido e os valores de tensão foram lidos, assim como as perdas nas linhas e potência total fornecida pela subestação alimentadora – ou seja, a potência consumida por este circuito. Da mesma forma, o *script* permitiu que fossem conhecidos os nós da rede nos quais devem ser inseridas as potências geradas pelas fontes de GD.

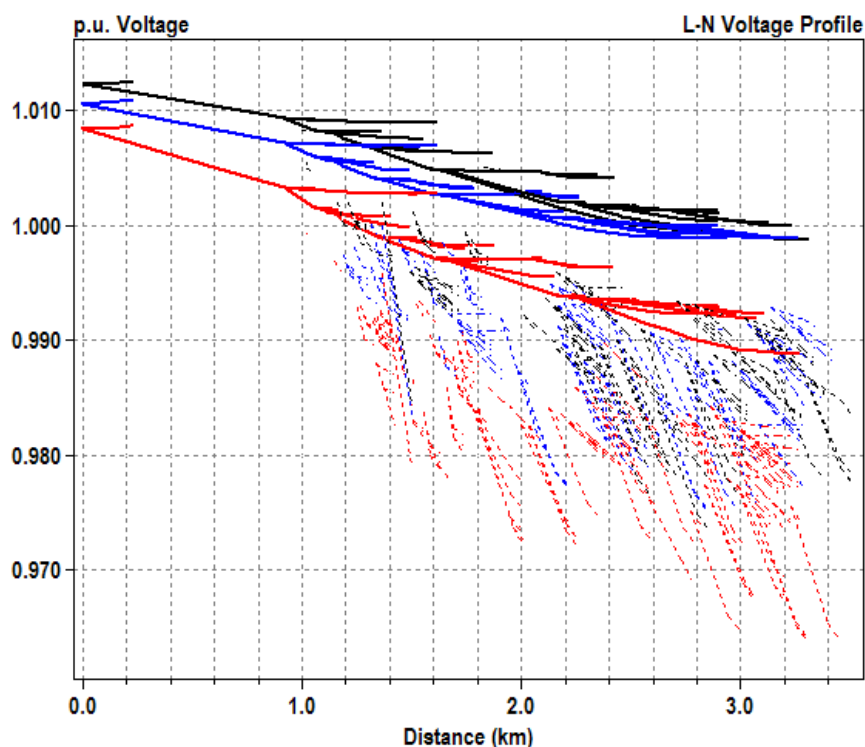
A Figura 8 exhibe os perfis de tensão nas barras em relação à distância da subestação alimentadora, antes da penetração de geração. A Tabela 4 exhibe alguns dados do sistema informados pelo OpenDSS e lidos pelo MATLAB. Considerando que a SE alimentadora tem potência nominal de 16,8 MVA, pode-se dizer que esta rede encontra-se bastante carregada.

Tabela 4 – Dados do circuito original

Elementos	4120
Barras	2596
Tensão máxima (p.u.)	1,0149
Tensão mínima (p.u.)	0,96411
Potência ativa (MW)	15,6731
Potência reativa (Mvar)	1,40096
Perdas ativas (MW)	0,190696
Perdas ativas (%)	1,217

Fonte: Autor.

Figura 8 – Tensão na rede sem inserção de GD



Fonte: EPRI (2018).

A partir desse ponto, são inseridos os valores para a primeira simulação do MMC e rodado o fluxo de potência com estes. Em um dos casos, a inserção de geração distribuída foi tão alta que a potência na subestação alimentadora tornou-se negativa, ou seja, o sistema estava fornecendo potência para a rede de transmissão. Tanto em níveis de tensão quanto em perdas, o caso violou os limites estabelecidos no Item 3.2, além de causar valores incomuns de potência reativa no circuito. Este caso foi corretamente rejeitado pelo algoritmo – os dados são exibidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Exemplo de caso reprovado

Elementos	4279
Barras	2596
Tensão máxima (p.u.)	1,1197
Tensão mínima (p.u.)	1,0154
Potência ativa (MW)	-3,91058
Potência reativa (Mvar)	-7,06192
Perdas ativas (MW)	0,539965
Perdas ativas (%)	13,81

Fonte: Autor.

Após o término da sequência de simulações promovidas pelo método de Monte Carlo, o melhor caso dentre os gerados foi informado pelo *script*. A exibição dos resultados no console do MATLAB, embora extremamente simples, dá-se de forma satisfatória. O caso ótimo desse sistema é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Caso ideal de penetração de GD no circuito de teste

Elementos	4279
Barras	2596
Tensão máxima (p.u.)	1,0404
Tensão mínima (p.u.)	0,9872
Potência ativa (MW)	9,9272
Potência reativa (Mvar)	0,1089
Perdas ativas (MW)	0,081056
Perdas ativas (%)	0,8165

Fonte: Autor.

Constata-se, primeiramente, que o número de elementos passou de 4.120 no caso original para 4.279 nos casos simulados, isto é, o algoritmo encontrou 159 pontos para inserção de fontes de geração e incluiu estes componentes na modelagem. Percebe-se também que o nível de tensão subiu, conforme esperado ao adicionar novas fontes à tensão nominal na BT. O limite superior no caso ótimo retornou em 1,0404 p.u., valor ligeiramente inferior ao limite utilizado, o que também indica a funcionalidade do código. As perdas proporcionais diminuíram de 1,217% para 0,8165%, não violando o limite deste circuito, uma vez que o valor absoluto também diminuiu, de 190,7 kW para 81,056 kW.

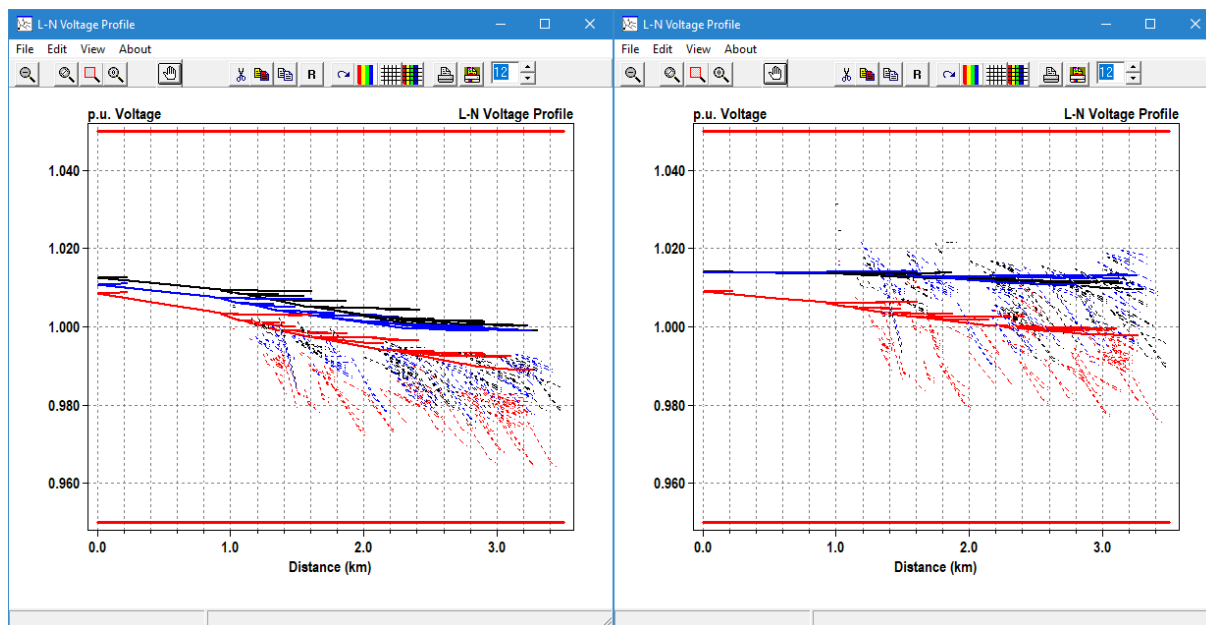
A diferença de 5,71 MW de potência ativa entre os casos original e simulado é o fator utilizado para considerar o exemplo apresentado como ideal dentre os aprovados pelo MMC. Esse resultado representa que, neste *snapshot*, o sistema estaria consumindo 5,71 MW (5,8078 MVA de potência aparente) a menos da rede de transmissão, sendo que este total estaria espalhado pelos circuitos de distribuição deste sistema, com uma potência média de 35,9 kW por barra – esses valores são aproximados, pois ainda deve ser considerada a diferença entre as perdas nos condutores.

Durante o desenvolvimento do código, o número de simulações de Monte Carlo a cada execução foi de apenas 100 ou 1.000, para agilizar a validação a cada

modificação. Estes resultados finais, entretanto, foram obtidos com 10.000 ciclos, sendo que assim o *script* levou pouco mais de 7 minutos para ser executado, enquanto este tempo foi de apenas 5 segundos para 100 simulações e 44 segundos para 1.000 simulações. Não há diferença significativa nos resultados ao rodar o código mais de uma vez, o que indica que 10.000 pode ser um número adequado de ciclos, ao menos para o circuito selecionado.

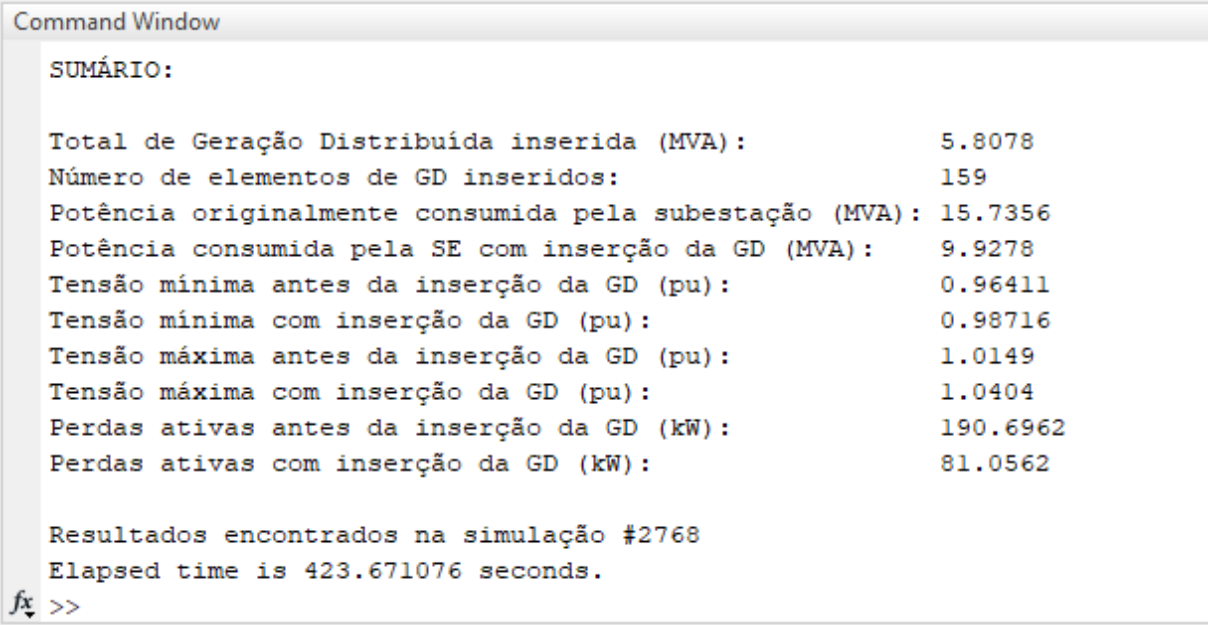
A Figura 9 exibe os perfis de tensão gerados pelo OpenDSS a partir do MATLAB antes (à esquerda – semelhante à Figura 8, porém em escala e exibindo os limites de tensão) e depois da inserção da GD encontrada no caso ótimo. Nota-se um aumento relativo nos níveis de tensão à medida que aumenta a distância para a SE, especialmente nas redes secundárias, indicadas por linhas tracejadas – as cores preta, azul e vermelha representam as três fases (trata-se de um sistema desequilibrado). A Figura 10 exibe o resumo dos dados no console do MATLAB após a execução apresentada (os valores de GD associados a cada barra também são exibidos no MATLAB).

Figura 9 – Perfis de tensão antes e depois da otimização



Fonte: Autor.

Figura 10 – Resultados no console do MATLAB



```

Command Window

SUMÁRIO:

Total de Geração Distribuída inserida (MVA):          5.8078
Número de elementos de GD inseridos:                  159
Potência originalmente consumida pela subestação (MVA): 15.7356
Potência consumida pela SE com inserção da GD (MVA):   9.9278
Tensão mínima antes da inserção da GD (pu):           0.96411
Tensão mínima com inserção da GD (pu):                0.98716
Tensão máxima antes da inserção da GD (pu):           1.0149
Tensão máxima com inserção da GD (pu):                1.0404
Perdas ativas antes da inserção da GD (kW):           190.6962
Perdas ativas com inserção da GD (kW):                81.0562

Resultados encontrados na simulação #2768
Elapsed time is 423.671076 seconds.

fx >>

```

Fonte: Autor.

4.2 Modelos padrão

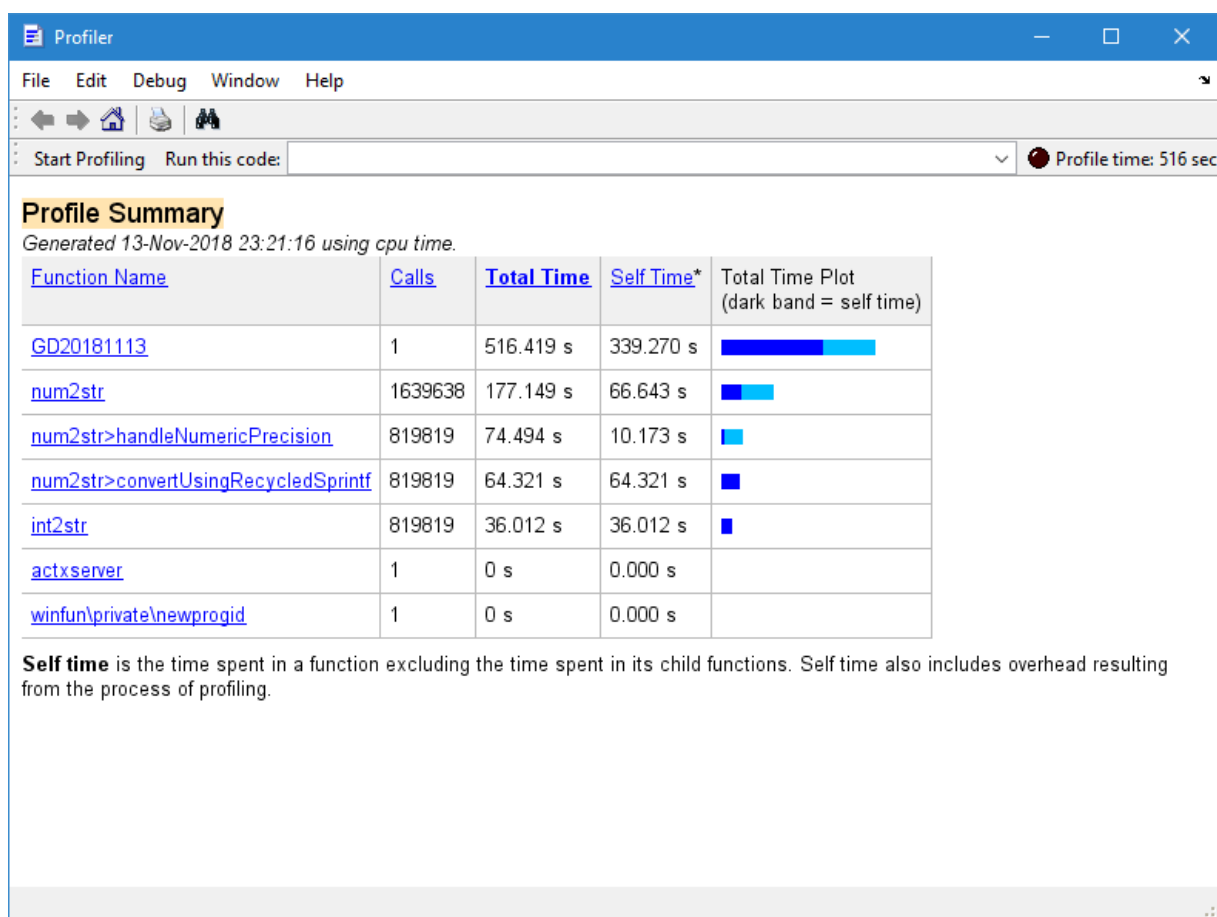
Após diversos testes, ajustes e correções no algoritmo aplicado ao caso de teste, a versão considerada final foi aplicada a outros dois casos disponibilizados pela EPRI (2018), para verificar se o código roda com estes circuitos sem que seja necessária nenhuma modificação no *script*. Estes casos estão disponíveis no endereço <http://dpv.epri.com/feeder_models.html> (último acesso em novembro de 2018), sendo M1 o caso de teste e J1 e K1 os casos apresentados nesta seção.

Nota-se que os três modelos desenvolvidos pela EPRI são circuitos onde está prevista a inserção de geração fotovoltaica, porém, ao utilizar o código desenvolvido é selecionado o arquivo “Master_noPV.dss” de cada circuito, que considera a rede de distribuição primária sem a inserção de qualquer fonte de geração.

A principal diferença entre os circuitos é o número de pontos admissíveis para inserção de fontes de geração, sendo 320 nós na rede K1 e 819 nós na rede J1. O maior impacto desta diferença é o tempo de execução do algoritmo, que chegou a 8 minutos e 36 segundos no caso J1 para 1.000 simulações, conforme Figura 11. O

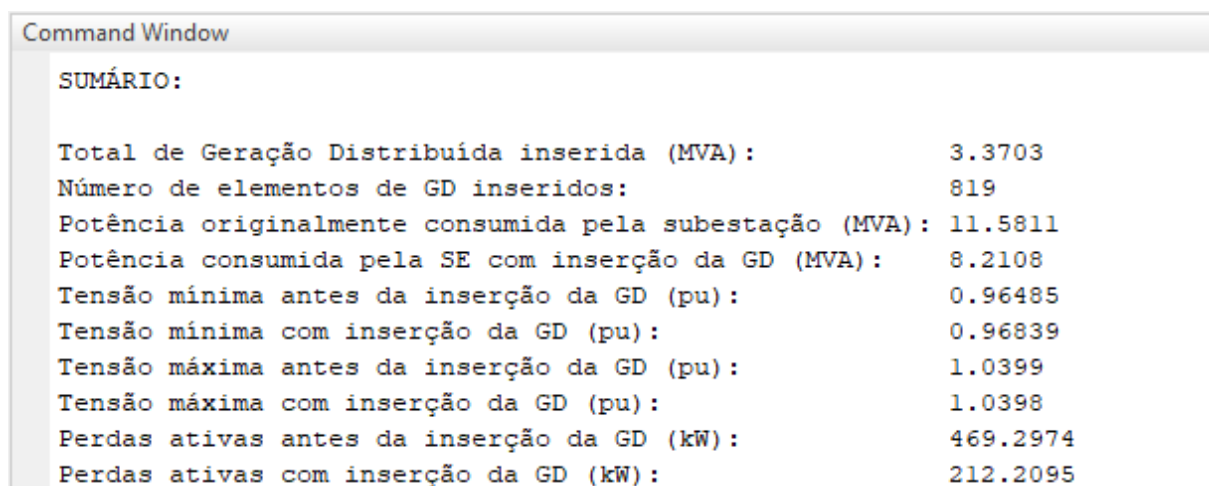
computador utilizado é um Intel Core i7-5500U a 2,4 GHz, equipado com 16 GB de memória, rodando o Microsoft Windows 10 de 64 bits. A Figura 12 exibe estes resultados.

Figura 11 – Tempo de execução para 1.000 simulações no caso J1



Fonte: Autor.

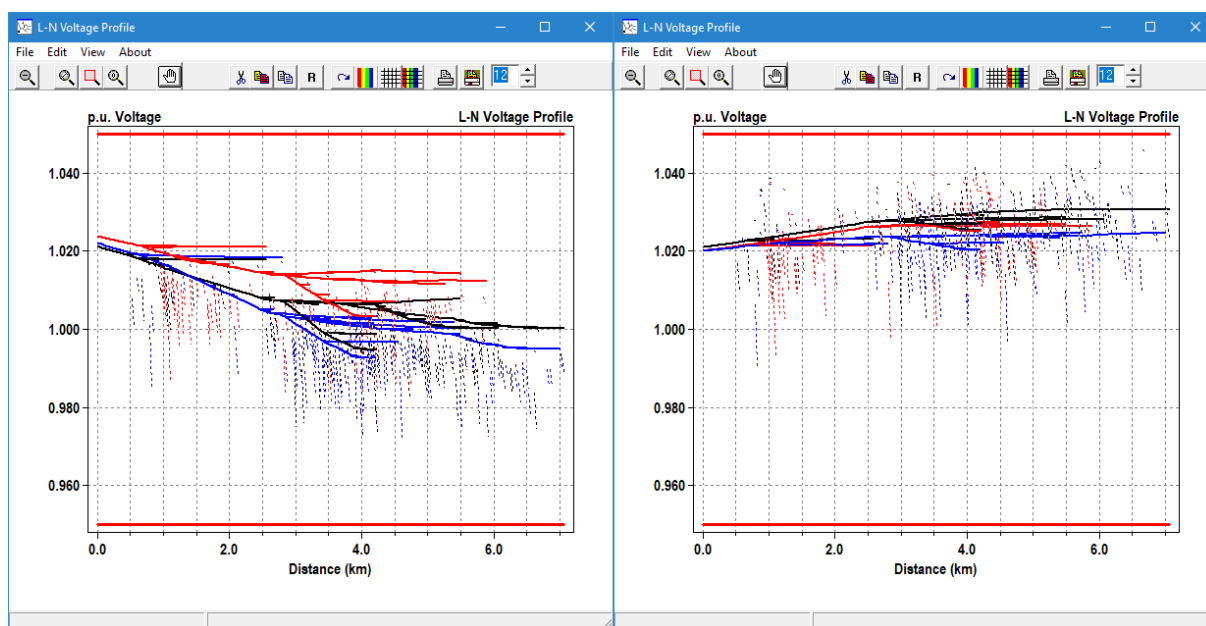
Figura 12 – Resultados do caso J1 no console do MATLAB



Fonte: Autor.

Para o caso K1, a quantidade de barras para aplicação de GD é cerca de o dobro do número no caso de teste, por isso, foi utilizado o mesmo valor de 10.000 simulações de Monte Carlo, o que acarretou no tempo de execução de 13 minutos e 38 segundos. As Figuras 13 e 14 exibem os perfis de tensão e os resultados no MATLAB, respectivamente.

Figura 13 – Perfis de tensão do caso K1 antes e depois da otimização



Fonte: Autor.

Figura 14 – Resultados do caso K1 no console do MATLAB

```

Command Window

SUMÁRIO:

Total de Geração Distribuída inserida (MVA):           5.2939
Número de elementos de GD inseridos:                   320
Potência originalmente consumida pela subestação (MVA): 12.949
Potência consumida pela SE com inserção da GD (MVA):    7.6551
Tensão mínima antes da inserção da GD (pu):            0.9717
Tensão mínima com inserção da GD (pu):                 0.99749
Tensão máxima antes da inserção da GD (pu):            1.0239
Tensão máxima com inserção da GD (pu):                 1.0493
Perdas ativas antes da inserção da GD (kW):            199.3656
Perdas ativas com inserção da GD (kW):                 96.897

Resultados encontrados na simulação #7006
Elapsed time is 818.594422 seconds.

fx >>

```

Fonte: Autor.

Percebe-se que, proporcionalmente, os resultados foram semelhantes após a aplicação do algoritmo nos três casos, sendo um tanto mais expressivos no caso K1, principalmente nos níveis de tensão ao longo das linhas (FIGURA 13).

A Tabela 7 compara brevemente os resultados obtidos nos três casos. Nota-se que, embora tenha um maior número de barras aptas a receber GD, a potência total do caso J1 ainda é menor que as demais, o que ajuda a limitar a potência inserida em fontes de geração, também levando a uma média de apenas 4,12 kVA por barra.

Tabela 7 – Comparação entre os resultados dos três casos

Grandeza	Caso M1	Caso J1	Caso K1
Potência aparente total (MVA)	15,7356	11,5811	12,949
Potência inserida em GD (MVA)	5,8078	3,3703	5,2939
Percentual da carga atendido pela GD	36,91%	29,10%	40,88%
Número de fontes inseridas	159	819	320
Média de potência por barra (kVA)	36,53	4,12	16,54

Fonte: Autor.

A diminuição das perdas ativas é um efeito positivo esperado em quase qualquer caso onde seja injetada geração distribuída, uma vez que cada fonte de geração já supre parte da demanda instalada no mesmo circuito secundário, reduzindo as correntes e perdas por efeito Joule. A exceção seria um trecho entre o alimentador e um trafo sobredimensionado, onde a inserção de GD poderia causar um fluxo de potência no sentido carga-fonte maior que o existente no sentido fonte-carga. Porém, esta configuração é pouco observada e afetaria apenas parte da rede analisada – os resultados totais ainda seriam positivos.

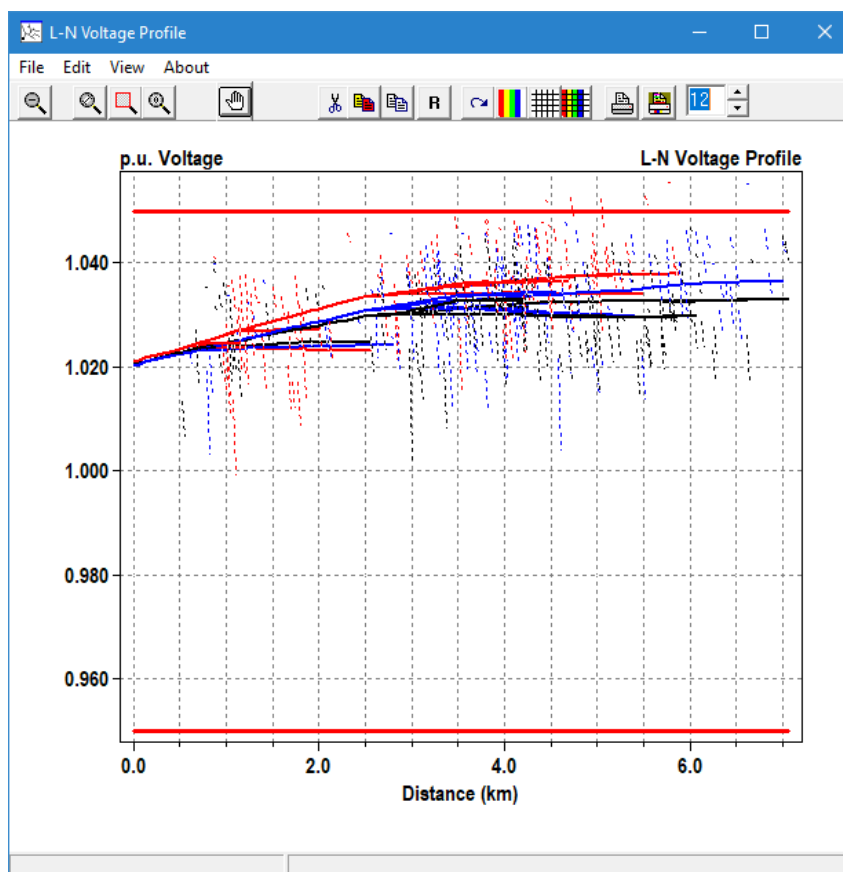
4.3 Sensibilidade do algoritmo

Como o código funcionou conforme o esperado, conclui-se que todos os dados lidos e escritos pelo MATLAB estão corretos. Tendo acesso a estes dados, é possível alterar os parâmetros de forma manual ou automática para obter informações adicionais do sistema analisado, além de apontar o caso ideal de inserção de GD.

É possível fixar uma potência de geração distribuída, absoluta ou proporcional, e verificar, para aquela potência, qual a porcentagem de casos simulados onde há violações de tensão e perdas. É possível também avaliar o carregamento nas linhas e nos transformadores, determinar quantas barras tiveram a tensão superada e quantos trechos tiveram sobrecarga, e assim determinar o percentual de simulações onde houve aumento de perdas, o percentual onde houve violação dos limites de tensão, o percentual onde houve extrapolação da capacidade de condução de corrente dos cabos, e outros dados. Estas análises não foram realizadas neste trabalho, mas todos os dados estão disponíveis, estando o programa apto a fazê-las

Pode ser feita, para um mesmo circuito, a comparação dos resultados ao alterar parâmetros como os limites mínimo e máximo de tensão e a sobrecarga admissível nos transformadores de distribuição. A Figura 15 exibe o perfil de tensão do caso K1 ao trabalhar com até 20% de sobrecarga nos trafos, enquanto os níveis de tensão foram limitados entre 0,9 p.u. e 1,1 p.u. – a Figura 16 exibe estes resultados no console do MATLAB.

Figura 15 – Perfil de tensão do caso K1 após alteração de parâmetros



Fonte: Autor.

Figura 16 – Resultados do caso K1 após alteração de parâmetros

Command Window	
SUMÁRIO:	
Total de Geração Distribuída inserida (MVA):	6.3776
Número de elementos de GD inseridos:	320
Potência originalmente consumida pela subestação (MVA):	12.949
Potência consumida pela SE com inserção da GD (MVA):	6.5714
Tensão mínima antes da inserção da GD (pu):	0.9717
Tensão mínima com inserção da GD (pu):	0.99532
Tensão máxima antes da inserção da GD (pu):	1.0239
Tensão máxima com inserção da GD (pu):	1.0719
Perdas ativas antes da inserção da GD (kW):	199.3656
Perdas ativas com inserção da GD (kW):	109.5431

Fonte: Autor.

Comparando aos resultados mostrados nas Figuras 13 e 14, é verificado um aumento na inserção máxima de geração distribuída de pouco mais de 1,0 MVA, em troca do aumento do nível máximo de tensão para 1,0719 p.u., além de um aumento também observado nas perdas ativas totais. Ou seja, com uma flexibilização de 20% na carga máxima dos transformadores houve um ganho de 21,73% na inserção de GD – um valor expressivo, que confirma que esse tipo análise também é útil.

Embora estas alterações tenham sido feitas de forma manual neste trabalho, é aberta a possibilidade de algumas inserções no *script* que façam estas e outras comparações de forma automática.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou as etapas do desenvolvimento de um sistema objetivado a determinar os pontos em uma rede de distribuição onde podem ser inseridas fontes de geração distribuída e a potência máximas destas fontes, listadas para cada barra da rede, sem que sejam violados os limites elétricos dos circuitos, para redução da potência fornecida pela rede de transmissão ao mesmo.

O objetivo foi alcançado. Em todos os resultados, foi observado o tempo necessário para analisar um circuito grande, com um número adequado de simulações. Estima-se que um circuito com 1.000 barras aptas a receber GD, simulada 10.000 vezes pelo MMC, pode levar até 1 hora e 45 minutos para ser analisado em um computador pessoal. Neste caso, seriam necessárias mais de vinte milhões de trocas de informações entre o MATLAB e o OpenDSS através da interface COM, para criar fontes, alterar potências e ler resultados. Durante a elaboração do trabalho, não foram encontrados outros métodos para realizar esse tipo de análise, portanto, é incerto determinar se os tempos de processamento observados são adequados ou longos demais. Estes tempos também podem ser melhorados se o algoritmo for programado de modo a utilizar simultâneos núcleos do microprocessador (*multithreading*).

5.1 Melhorias

Atualmente, os parâmetros necessários para analisar um circuito estão declarados no *script* para o MATLAB, sendo estes o caminho do arquivo, as tensões mínima e máxima admissíveis, a perda total admissível, a sobrecarga permitida nos transformadores e o número de simulações de Monte Carlo a realizar. Estes dados poderiam ser informados pelo usuário a partir de um *prompt* ou pelo comando *input*.

Além disso, a saída das informações é feita pelo console do MATLAB. Pode ser elaborado um método de salvar essas informações em um arquivo, seja apenas com o caso ideal, com diversos casos em um arquivo de valores separados por vírgula (*comma-separated values* – CSV), ou ainda com análises mais profundas das situações, como as propostas no Item 4.3.

5.2 Continuidade

A principal sugestão para a continuidade deste trabalho é a implementação do código escrito para o MATLAB em Python: uma linguagem de programação de propósito geral. Ao contrário do MATLAB, é gratuita e de código aberto, como o OpenDSS (PYTHON, 2018). A utilização deste recurso torna o trabalho inteiramente independente de softwares pagos. Além disso, o OpenDSS também é desenvolvido em Python, o que deve evitar qualquer problema de incompatibilidade ou mesmo reduzir o tempo de execução do algoritmo.

O código desenvolvido considera cargas e geração fixas, como os valores reais lidos em um determinado instante do dia (modo *snapshot*). Porém, o OpenDSS também trabalha com curvas de carga e curvas de geração, inclusive geração fotovoltaica ao longo das horas do dia. A implementação destes recursos é uma proposta de continuidade deste trabalho, juntamente com a inserção de dispositivos de armazenamento de energia na rede.

As diferentes análises já possíveis a partir do algoritmo apresentado, citadas no Item 4.3, também são sugestão de continuidade deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: abril 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 104**, de 1º de dezembro de 2014. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/026/documento/nota_tecnica_0104_srd.pdf>. Acesso em: outubro 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 678**, de 1º de setembro de 2015. Brasília, 2015a. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015678.pdf>>. Acesso em: abril 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 687**, de 24 de novembro de 2015. Brasília, 2015b. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: setembro 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 768**, de 17 de outubro de 2017. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>>. Acesso em: outubro 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>. Acesso em: novembro 2018.

BEN. **Balanco Energético Nacional**. 2015. Disponível em: <www.ben.epe.gov.br>. Acesso em: maio 2018.

BURBAN, Pierre Alexandre Charles. **Apreçamento de Opções Exóticas**: Uma abordagem pela simulação de Monte Carlo. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2008.

EPRI. **Distributed PV Monitoring and Feeder Analysis**. Palo Alto, 2018. Disponível em: <http://dpv.epri.com/feeder_m.html>. Acesso em: maio 2018.

FARRET, Felix A; SIMÕES, M. Godoy. **Integration of Alternative Sources of Energy**. IEEE, 2006.

GÖNEN, Turan. **Electric Power Distribution Engineering**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de Energia Elétrica**: Linhas aéreas. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de; ROBBA, Ernesto João. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

LAZO, P. P. D. **Monte Carlo para Problemas Determinísticos**: Sistemas lineares. Cascavel, 2009.

LORA, Electo Eduardo Silva; HADDAD, Jamil. **Geração Distribuída**: Aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

MME. **Ministério de Minas e Energia**. 2016. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: maio 2018.

OPENDSS. **OpenDSS download** | SourceForge.net. 2018. Disponível em: <<https://sourceforge.net/projects/electricdss/>>. Acesso em: maio 2018.

PEREIRA, Rafael. **O que é Geração Distribuída**. São Paulo: Portal Solar, 2017. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/o-que-e-geracao-distribuida.html>>. Acesso em: abril 2018.

PLANALTO – Presidência da República. **Decreto nº 5.163**, de 30 de julho de 2004. Brasília, 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm>. Acesso em: outubro 2018.

PYTHON Software Foundation. **About Python**. 2018. Disponível em: <<https://www.python.org/about/>>. Acesso em: maio 2018.

RUBINSTEIN, R. Y. **Simulation and the Monte Carlo Method**. John Willey and Sons, 1981.

SEXAUER, Jason. **OpenDSS Primer**: Introdução ao OpenDSS. Tradução de Paulo Radatz e Celso Rocha. EPRI, 2016.

SILVA, Neilton Fidelis da. **Energias Renováveis na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro**: O caso da energia eólica. Rio de Janeiro: Synergia, 2015.

SÓBOL, I. M. **Método de Monte Carlo**. Nova Iorque: MIR, 1983.

STEVENSON, William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

ZILLES, Roberto; MACÊDO, Wilson Negrão; GALHARDO, Marcos André Barros; OLIVEIRA, Sérgio Henrique Ferreira de. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.